

第6章 結 論

6.1 本研究のまとめ

全国には鉱山廃坑、地下採石場跡、戦時中の地下壕などの地下空洞が採掘当時のまま放置されている箇所が多数存在し、人々の記憶も薄れるほど長い年月を経て、突然陥没や沈下などの災害を引き起こすことがある。これらの空間や空洞を支える壁、柱あるいは天盤を構成する軟岩などの部位は、侵入した地下水や外気の変動による乾湿の繰り返しによる劣化やクリープによって破壊され、その影響が地表に伝播して地表面や地上の構造物が突然陥没や沈下を引き起こす。これらの現象は、短期的には安定性を保っていても、長期的には加速度的に不安定の領域に近づいていく。また、近い将来東海地震のような海溝型の大地震や直下型の大地震が列島各地に襲来すると予想されているが、特に廃坑などが大きな地震動を受けると、不安定な坑内が広範囲にわたって大崩壊を起こすことが懸念される。このように地下に潜む放置された空洞や空間は、常にそこに暮らす住民の命や財産を脅かしており、重大な社会問題として認識する必要がある。これらの空洞の対策工事などに要する期間を考えると、早急にその対応策を検討する時期に来ているといえる。

対策として有効なのは、被害の原因除去となるように地下空洞を埋め戻すことである。地下空洞の埋め戻しはこれまでに各種の方法で行われている。対象空洞の規模にもよるが、事前に十分な対策を施す場合、その規模はおのずと大きくなることから、可能な限り対策工法は経済的である必要がある。これには充てん工法が最も適している。充てん工法はもともと東海地方の垂炭廃坑対策として開発された工法で、今日、多数の実績のもとで埋め戻し材である充てん材の製造や品質管理が体系的に確立している。

本論文は、東海地方の垂炭廃坑を対象にした陥没・沈下などの地盤変状に対する危険度評価を行うとともに、このような空洞災害防止に必要な対策技術について、今日の多様なニーズに答えることを目的とした研究成果について示した。

対策技術に関する研究は、主に2つの研究より成る。1つは広い空洞の一区画を充てんする限定充てん工法の開発に関する研究である。従来のスラリー状態の充てん材は高い流動性を有することから、1つの充てん孔から注入した充てん材を空洞内の遠方にまで送ることが可能で、空洞が複雑な形状を成す場合でも均質に充てんできることが特徴であったが、空洞の一部を充てんしようとする場合、その高い流動性が災いして対象範囲外へも大量に流出する課題があった。この課題に対し、流動性を制御できる限定充てん工法を開発し、実工事に適用してその有効性を検証した。この研究の成果は、従来の充て

ん材の特徴である良好な充てん性を活かしながら、地下空洞の限定範囲を確実に、また効率よく充てんする工法を確立したことである。

ここで得られた知見を整理して示すと次のようになる。

- 1) 限定充てん工法は、端部材の連続充てんによる閉塞した隔壁の形成と、その内側の中詰材の組み合わせにより、一定領域の空洞充てんが可能であり、また空洞天端への密着充てんも良好である。
- 2) 限定充てん工法には添加剤の種類によって、2つのタイプがある。1つは亜炭廃坑のような空洞高さが比較的低く、また空洞内に地下水が浸入しているような場合に適合する水ガラスを添加する緩勾配タイプである。このタイプは充てん孔間隔を大きく取ることができる。もう1つのタイプは、地下採石場跡のような空洞高さが比較的高く、空洞内に地下水がないような場合に適合する急結剤を添加する急勾配タイプである。端部材による隔壁を急勾配とすることができる反面、充てん孔間隔を比較的小さく取る必要がある。このように、空洞の種類や状況によって2つの充てん材のタイプを使い分ける必要がある。
- 3) 緩勾配タイプの充てん材では水ガラスを添加するが、固化材にスラグセメント系固化材および水ガラスに Na_2O 含有量の少ない特殊水ガラスを用いることで長期耐久性を確保できる。
- 4) 急勾配タイプの端部材は、緩勾配タイプと比べて、塑性状態となった後も急激に流動性が低下し続ける。また、急結剤の添加量により、塑性状態となるゲルタイムおよびその後の流動性低下を表すフロー値は大きく変動する。このため、A液とB液混合後からの一定時間を確保して配管内でゲル化させ、その後、凝結・固化しない段階で空洞内に放出させるなど、時間管理を十分に行う必要がある。また、10℃程度以下の冬期で施工する場合は、端部材の流動性低下に配慮した急結剤添加量の設定が必要である。
- 5) 急勾配タイプの端部材について、将来さらに急勾配の隔壁が可能な充てん材を開発する必要性が生じると考えられる。これは急結剤添加量を増量することで可能と考えられるが、その充てん材は塑性化後の流動性が今以上に急低下するような状態変化を示すと思われるため、充てん材の混合から空洞内に注入されるまでの時間の管理をより厳格に行うか、または急結剤の改良など、材料面での検討が必要と考える。
- 6) 今後、充てん材強度のばらつきなど、強度特性に影響を与える要因を分析し、均一な品質が得られる配合について究明する必要がある。

対策技術に関する 2 つめの研究は、充てん材の母材として、従来用いられてきた材料、すなわち、東海地方の砕石工場で発生する脱水ケーキ等に代わるあらたなリサイクル材料の適用性に関する研究である。充てん工法は東海地方の亜炭廃坑を対象として技術の改良と検証を重ね、多数の実績を有し、空洞の埋め戻しを効率よく施工できる対策工法として一定の完成をみた総合技術であるが、まだ東海地方以外の地下空洞や空間に適用した事例は少ない。しかし、その材料的な特性や品質管理方法からみて、これらの空洞・空間に適用する場合にも非常に有効であると考えられた。そのためには、東海地方で産する脱水ケーキ等に代わるあらたなリサイクル材料を用いることが必要になる。この研究の成果は地域に限定されない各種のリサイクル材料について、充てん材に用いたときの適用性を明らかにしたことである。また、これによりリサイクル材料の新しい有効利用分野の確立に 1 つの方向性を示したことである。

ここで得られた知見を整理して示すと次のようになる。

- 1) 多くのリサイクル材料は適切な配合とすることにより充てん材の品質目標値を満足し、充てん材の構成材料になりうる。また粘土キラまたは脱水ケーキは母材としての単独使用による配合の簡素化が可能である。なお石炭灰、溶融スラグおよび下水灰については、調整材として脱水ケーキを添加する必要性がある。
- 2) 石炭灰充てん材、スラグ充てん材、下水灰充てん材の P 漏斗流下時間は、母材量の増加にともない大きくなる（流動性が低くなる）。特に石炭灰充てん材はリサイクル材率が高いほど流下時間が小さい（流動性が低い）。
- 3) 石炭灰充てん材、スラグ充てん材、下水灰充てん材のブリーディング率は、いずれも母材量の増加にともない小さくなる。特に下水灰充てん材はブリーディング率が小さい。また石炭灰充てん材およびスラグ充てん材はブリーディングを抑制するために低母材量域ではリサイクル材率を低めに設定する必要がある。
- 4) 石炭灰充てん材とスラグ充てん材の固化体強度については、材齢別に C/W との強い相関がある。下水汚泥充てん材の場合は、他の要因にも大きな影響を受ける。すなわち、石灰系では含水比 20% 程度の加水で大きな強度促進を図ることができる。また高分子系のようなリン含有量が多いものは、強度発現が阻害される可能性があり注意が必要である。これには固化材単位量を多くするかまたは焼却灰単位量を低めに抑える必要がある。

6.2 今後の研究課題

本研究により，地下空洞の危険度評価およびその対策技術である充てん工法の多様なニーズを背景とした応用技術の一分野を確立できたと考える．

一方で，これらに関する残された課題もいくつかあり，本論文で触れていない項目も含めて以下に列記する．

1) 空洞の危険度評価のための調査の問題

石炭鉱山廃坑の地表沈下や浅所陥没に関連する調査の例は数多くあるが，垂炭廃坑のように浅く，かつ薄い層に対する調査研究の例はほとんどない．空洞周辺の挙動は，地質構造，岩盤の力学特性およびその経年変化，空洞の位置や大きさ・形状，空洞内部および周辺地盤の地下水の状態など，多くの因子に影響される．現在は安定している空洞に対して，将来にわたる危険度評価を行う場合には，詳細な調査および試験を行うことが必要であるが，その所在位置が不明確であるかまたは空洞が広域にわたる場合が多く，多大な費用が障壁となって十分な情報が得られないことが多い．

2) 充てん工事のさらなるコストダウン化

大規模な空洞を対象に充てんを行う場合，自ずと工事費が高額にならざるをえない．この解決策として，材料種類，配合，充てん孔設置，設備などが考えられ，まだ検討結果によってはさらにコストダウンできると考えられる．

3) 充てん工法の材料に副産物を用いる場合の有害物質溶出の問題

副産物を材料に用いる場合，その物の由来や生成過程などからある程度有害物質を含有していることは避けられない事実である．したがって，これを長期間にわたって溶出しないように配合上の工夫や不溶化处理などで封じ込めることになり，室内試験，さらに試験施工によるモニタリングなどを行って検討することが必要である．

4) 充てん材の耐久性の問題

充てん材の材料として，従来の工法に用いる材料で製造した充てん材，限定充てん工法の充てん材，そしてあらたなりサイクル材料を用いて研究した充てん材は，いずれも自然環境下においては耐久性が低下することはないと考えられる．特殊な場合ではあるが，たとえば金属鉱山の廃坑のような強酸性の水に接するような環境の場合では，耐久性が極端に低下する．これを解決する技術を確立することは非常に困難と思われるが，期待される

効果は大きい。

今後、以上のような課題に取り組むことで空洞災害の予防に向けた合理的な調査方法、および対策技術の応用分野の拡大を図っていきたい。特に、充てん工法については、工事の実績を積み重ねとともに、試験や施工を通じてここまでの技術の検証も十分に行っていきたい。

謝 辞

本論文は、著者が昭和 53 年に飛島建設株式会社に入社したのち、主に平成 10 年から平成 18 年の間に名古屋支店管内で携わってきた亜炭廃坑などの放置された地下空洞の調査ならびに危険度評価およびその対策としての空洞充てん工法の技術開発に関する研究成果をまとめたものです。この間、多くの方々からご指導、ご支援をいただきました。

本論文をまとめるにあたり、早稲田大学理工学部教授 濱田政則先生には、研究全般にわたり、様々な観点より、きめ細かい御指導をいただきました。著者が学位を取得したいと濱田先生に申し出た際、一笑に付すことなく快くお引き受けいただき、また、濱田先生は第 94 代土木学会会長という立場でもある大変お忙しいなかではありますが、浅学で要領の悪い著者を見捨てることなく最後までご指導いただきました。著者が平成 18 年 6 月から早稲田大学理工学総合研究センターの嘱託研究員として、週のうち約半分を濱田研究室で勤務できたことも幸いでした。濱田先生との出会いがなければ、今の私はありませんでした。

早稲田大学理工学部教授 赤木寛一先生には、論文全体を詳細に査読したうえで貴重なご助言をいただき、論文改善の大変な参考になりました。

名古屋大学名誉教授 川本朧万先生は日本充てん協会会長でもあられ、著者が同協会技術委員になった平成 13 年から、地下空洞の調査および対策技術の研究開発全般にわたってご指導をいただけてきました。また、このたびの学位取得のために親身になって応援いただき、まことに身に余る光栄であります。

東海大学海洋学部教授 アイダン・オメル先生は、平成 16 年から岐阜県御嵩町の亜炭廃坑内の岩盤に計器を設置して空洞の動態観測を行っておられ、著者もそのアシスタントの一員として幾度となく坑内に立ち入り、空洞岩盤の劣化や崩壊現象を調査しました。そしてこれらを分析した成果を本論文に引用させていただきました。また、2005 年（平成 17 年）11 月の Post-Mining Symposium および 2006 年（平成 18 年）11 月の 4th Asian Rock Mechanics Symposium における研究発表のデータの提供と発表のサポートをいただき、大変感謝しております。

飛島建設株式会社名古屋支店 杉浦所長は、平成 2 年の日進折戸東部土地区画整理事業亜炭採掘跡充填工事を先駆けとして、東海環状自動車道のような大規模プロジェクトなどに

かかわる空洞充てん工事を担当してられました。この間、本論文で取り上げた限定充てん工法の開発やリサイクル材料を用いた充てん材の適用性に関する研究の企画や開発チームの指導を行ってられました。杉浦所長は著者が学位を取得することを最初に勧めていただいた方でもあり、また研究成果の取りまとめについても、多大なご支援をいただきました。

本研究を遂行するにあたり、以上のお名前を挙げた皆様以外にもたくさんの方々から、データの提供や数多くのご指導、ご支援をいただきました。心より感謝の意を表します。まことにありがとうございました。

2007 年 2 月

坂本昭夫